

覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳

刘欢 曹士英 孟飞 林百科 方占军

Er-fiber femtosecond optical frequency comb covering visible light

Liu Huan Cao Shi-Ying Meng Fei Lin Bai-Ke Fang Zhan-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 094204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光子晶体光纤飞秒激光非线性放大系统的耦合动力学过程研究

Coupling dynamics for a photonic crystal fiber femtosecond laser nonlinear amplification system

物理学报.2015, 64(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094203>

300W 侧面分布式抽运掺 Yb 全光纤放大器

300 W all-fiber amplifier with distributed side-coupled pump configuration

物理学报.2015, 64(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084205>

高重复频率全光纤被动锁模掺铒光纤激光器

High-repetition-rate passively mode-locked erbium-doped all fiber laser

物理学报.2015, 64(6): 064206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064206>

增益导引-折射率反导引大模场光纤激光器抽运技术研究进展

Progress in gain-guided and index-antiguide large mode area fiber laser pump technology

物理学报.2015, 64(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024210>

780W 全光纤窄线宽光纤激光器

780 W narrow linewidth all fiber laser

物理学报.2014, 63(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134205>

## 覆盖可见光波长的掺Er光纤飞秒光学频率梳\*

刘欢<sup>1)</sup> 曹士英<sup>2)†</sup> 孟飞<sup>2)</sup> 林百科<sup>2)</sup> 方占军<sup>2)</sup>

1) (清华大学精密仪器系, 激光与光子技术研究室, 北京 100084)

2) (中国计量科学研究院, 时间频率计量研究所, 北京 100029)

(2014年10月2日收到; 2014年11月7日收到修改稿)

飞秒光学频率梳波长覆盖范围向可见光波长扩展对于碘稳频激光的绝对频率测量以及光钟研究中钟激光的绝对频率测量都具有十分重要的意义. 本文在自行研制掺Er光纤飞秒光学频率梳的基础上, 采用放大-倍频-扩谱的方案, 实现了激光输出波长向可见光波长的扩展. 掺Er光纤飞秒光学频率梳输出的一部分光激光脉冲, 功率约为8 mW, 首先经掺Er光纤放大器将功率提高到531 mW, 此后利用MgO:PPLN晶体倍频, 倍频后激光的功率为170 mW, 倍频效率为32%, 脉冲宽度为85 fs. 倍频后的激光通过光子晶体光纤进行光谱展宽. 通过优化入射光偏振状态可以实现波长覆盖500—1000 nm, 输出功率为85 mW, 耦合效率为50%. 采用小型化碘稳频532 nm Nd:YAG激光器输出激光与光学频率梳光谱展宽后的激光进行拍频可以获得30 dB的拍频信号. 覆盖可见光波长的掺Er光纤飞秒光学频率梳为可见光范围内激光的绝对频率测量提供了技术手段.

**关键词:** 掺Er光纤激光器, 光纤光学频率梳, 光谱展宽, 光学频率计量

**PACS:** 42.55.Wd, 42.65.Re, 06.30.Ft, 95.55.Sh

**DOI:** 10.7498/aps.64.094204

## 1 引言

飞秒光学频率梳的出现使光学频率测量领域发生了前所未有的革命<sup>[1]</sup>. 飞秒光学频率梳可以实现光学绝对频率测量, 把长度单位米(m)直接溯源到时间单位秒(s), 也可以通过协调世界时(UTC)实现实时的国际比对和等效互认<sup>[2]</sup>. 作为连接微波频标与光频标的桥梁, 飞秒光学频率梳是高准确度光钟基准装置研究和应用的重要技术保障, 已成为新一代时间基准建立过程中的重要环节<sup>[3-6]</sup>.

近年来, 超短脉冲技术和光纤制造技术的发展带动了光纤飞秒光学频率梳(简称光纤光梳)的快速发展和广泛应用<sup>[7-9]</sup>. 光纤飞秒光学频率梳在一定程度上有逐步取代钛宝石飞秒光学频率梳的趋势. 光纤飞秒光学频率梳从波长上可以分为掺Er

光纤飞秒光学频率梳<sup>[10]</sup>和掺Yb光纤飞秒光学频率梳<sup>[11]</sup>.

光纤飞秒光学频率梳由于体积小、成本低廉、稳定性高、易于操作等诸多优点而受到人们的广泛青睐. 特别是对于1.5 μm通信波段的掺Er光纤飞秒光学频率梳, 不仅在传输和控制上具有标准产品, 更重要的是通过对其倍频可以取代钛宝石飞秒光学频率梳. 从长远发展看, 综合了体积小、功耗低、价格低以及各种优良光学性能的光纤光学频率梳是光学频率梳发展的必然趋势.

掺Er光纤飞秒光学频率梳的中心波长在1.5 μm附近. 尽管通过高非线性光纤扩谱可以实现1000—2200 nm的宽带光谱输出<sup>[12-14]</sup>, 但这个光谱处于红外波段, 很难满足实际的激光波长测量需求. 一方面, 计量学中复现国际单位制(SI)单位m通常采用CIPM推荐的波长标准来实现. 在这些被推荐的波长标准中, 有7种是以碘分子的饱和

\* 清华大学自主科研项目(批准号: 20131089299), 质检公益性行业科研专项(批准号: 201310007), 北京高等学校青年英才计划(批准号: YETP0087)和精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金(批准号: pil1201)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: caoshiying@nim.ac.cn

吸收谱线为参考实现波长稳定的, 并且这7个波长标准均处于可见光域. 其中, 又以碘稳频 633 nm He-Ne激光器<sup>[15]</sup>和碘稳频 532 nm Nd: YAG激光器<sup>[16,17]</sup>在长度计量中的应用最为广泛. 另一方面, 在目前光钟的研究领域中, 对钟激光的绝对频率测量以及不同类型光钟之间的频率比对是光钟研究的一个重要环节<sup>[18,19]</sup>. 这也要求光学频率梳的波长范围必须能够覆盖到钟激光的波长. 而铯原子光钟的钟激光波长在 698 nm 附近<sup>[5]</sup>、钙离子光钟的钟激光波长在 729 nm 附近<sup>[6]</sup>. 这些激光的波长都处于可见光域. 因此将掺 Er 光纤飞秒光学频率梳的波长向可见光域扩展更能吸引科研工作者的兴趣, 同时也可以进一步推动掺 Er 光纤飞秒光学频率梳的广泛应用.

本文在自行研制的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳的基础上<sup>[20]</sup>, 以其中一个端口为源头, 通过放大-倍频-扩谱的方案, 实现了激光输出波长向可见光波长的扩展, 波长覆盖范围为 500—1000 nm, 输出功率为 85 mW. 采用该飞秒光学频率梳与小型化碘稳频 532 nm Nd: YAG 激光器进行拍频, 获得了 30 dB 信噪比的拍频信号, 为可见光范围内激光的绝对频率测量提供了技术手段.

## 2 实验装置

覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳, 如图 1 所示. 整个光学部分由抽运源单元、掺 Er 光纤光梳单元和可见光扩谱单元三部分构成.

抽运源单元(图 1 中 F 部分)包含 7 个 980 nm 半导体激光模块 LD, 均为单模光纤输出, 其中 LD1 用于掺 Er 光纤飞秒激光器(图 1 中 A 部分)提供增益、LD2 和 LD3 用于掺 Er 光纤飞秒放大器 1(图 1 中 B 部分)提供增益、LD4, LD5, LD6 和 LD7 用于掺 Er 光纤飞秒放大器 2(图 1 中 D 部分)提供增益.

掺 Er 光纤光梳单元包含掺 Er 光纤飞秒激光器(图 1 中 A 部分)、掺 Er 光纤飞秒放大器 1(图 1 中 B 部分)、高非线性光纤扩谱和  $f-2f$  干涉仪(图 1 中 C 部分). 这三部分是构成光纤光梳的基本部分, 主要功能是实现对激光器重复频率  $f_r$  和载波包络偏移频率  $f_0$  的探测, 详细结构可以参见文献<sup>[20]</sup>.

为了实现掺 Er 光纤光梳向可见光扩谱, 我们采用放大-倍频-扩谱的方案. 可见光扩谱单元含掺 Er 光纤飞秒放大器 2(图 1 中 D 部分)、倍频和光子晶体光纤扩谱(图 1 中 E 部分).

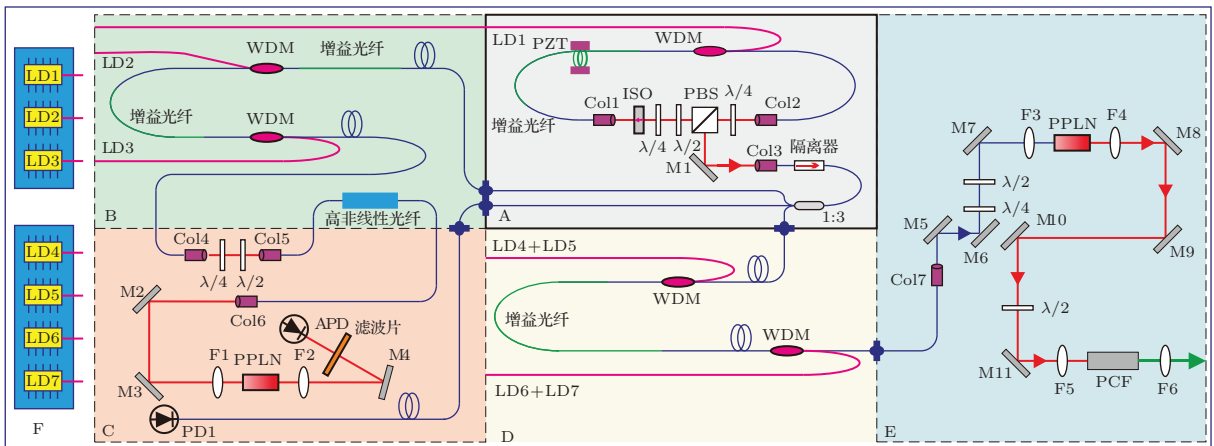


图 1 覆盖可见光波长的掺 Er 光纤飞秒光学频率梳(其中: A 部分为掺 Er 光纤飞秒激光器, B 部分为掺 Er 光纤飞秒放大器 1, C 部分为高非线性光纤扩谱和  $f-2f$  干涉仪, D 部分为掺 Er 光纤飞秒放大器 2, E 部分为倍频和光子晶体光纤扩谱, F 部分为抽运源单元, LD1—LD7 为 980 nm 激光二极管, WDM 为 980 nm/1550 nm 波分复用器件, Col1—Col7 为光纤准直器, PBS 为偏振分光片, ISO 为空间隔离器,  $\lambda/4$  为四分之一波片,  $\lambda/2$  为二分之一波片, M1—M11 为平面反射镜, F1—F6 为透镜, PCF 为光子晶体光纤, PPLN 为倍频晶体, APD 为 InGaAs 雪崩光电探测器, PD1 为 InGaAs 光电探测器, PZT 为压电位移器)

Fig. 1. Setup for an Er-FOFC with wavelengths covering visible light. Part A is an Er-doped femtosecond fiber laser, Part B is Er-doped femtosecond fiber amplifier I, Part C is a highly nonlinear fiber, spectrum broadening and  $f-2f$  interferometer, Part D is Er-doped femtosecond fiber amplifier II, Part E is frequency-doubling and photonic crystal fiber-based spectrum broadening, and Part F is pump sources. LD1—LD7, 980 nm laser diodes; WDM, 980 nm/1550 nm wavelength division multiplexing; Col1—Col7, fiber collimators; PBS, polarization beam splitter; ISO, space isolator;  $\lambda/4$ , quarter wave plate;  $\lambda/2$ , half wave plate; M1—M11, plane mirrors; F1—F6, focus lenses; PCF, photonic crystal fiber; PPLN, periodically-poled lithium niobate crystal; APD, InGaAs avalanche photodetector; PD1, InGaAs photodetector; PZT, piezoelectric transducer.

### 3 可见光扩谱

从掺 Er 光纤飞秒激光器输出的激光脉冲, 经光纤准直器、光纤隔离器和一分三分束器后分成三路, 其中的一路光作为可见光扩谱单元的种子源, 平均功率为 8 mW. 该路光进入掺 Er 光纤飞秒放大器 2. 该放大器采用双端抽运结构, 其中 LD4 和 LD5 经光纤型偏振合束器(图 1 中未画出) 合束后作为掺 Er 光纤放大器 2 的前向抽运源, LD6 和 LD7 经光纤型偏振合束器(图 1 中未画出) 合束后作为掺 Er 光纤放大器 2 的后向抽运源. LD4—LD7 均为保偏光纤尾纤输出, 在 1.2 A 电流驱动下, 每个 LD 的输出功率分别为 760 mW, 737 mW, 760 mW 和 750 mW. 由于合束器自身损耗, 经过合束器后每个 LD 的输出功率降低为 662 mW, 669 mW, 649 mW 和 672 mW. LD4 和 LD5 合束后输出总功率为 1313 mW, 合束效率为 87.71%, LD6 和 LD7 合束后输出总功率为 1292 mW, 合束效率为 85.56%.

掺 Er 光纤放大器 2 采用 LIEKKI 公司 Er80-4/125 型号的增益光纤, 它在 1530 nm 处的吸收率为 80 dB/m. 对于放大器中增益光纤的长度, 我们通过逐渐剪短光纤监测放大器输出功率的方法来获取光纤的最佳长度, 实验中采用的最佳长度为 1.4 m. 图 2 给出了不同抽运状态下掺 Er 光纤放大器的输出功率. 从图中可以看出, 单开前向抽运中的 LD4, 放大功率为 82 mW, 单开前向抽运中的 LD5, 放大功率为 83 mW, 而单开后向抽运中的 LD6, 放大功率为 153 mW, 单开后向抽运的中 LD7, 放大功率为 149 mW. 当前向抽运全部打开, 而后向抽运全部关闭时, 放大功率可以达到 155 mW, 反之当后向抽运全部打开, 而前向抽运全部关闭时, 放大功率可提高到 295 mW.

在掺 Er 光纤放大器中, 种子光放大功率和抽运光因为吸收、受激辐射和自发辐射等因素而沿着光纤长度方向变化. 这些变化与光纤放大器的抽运方式密切相关. 与前向抽运方式相比, 后向抽运方式使得进入掺 Er 光纤放大器的种子光功率可以很快达到饱和状态时, 从而抑制放大器的自发辐射, 提高抽运功率的转换效率. 另一方面, 前向抽运方式容易导致光纤放大器末端获得的抽运功率不足, 同时种子光放大功率易受末端光纤吸收的影响. 因此, 光纤放大器采用后向抽运方式获得的放大功率要明显高于前向抽运方式. 在单端抽运结构中, 我

们首选后向抽运方式<sup>[14]</sup>. 当前向抽运功率为 1313 mW, 后向抽运功率为 1292 mW 时, 本系统放大后输出功率为 531 mW.

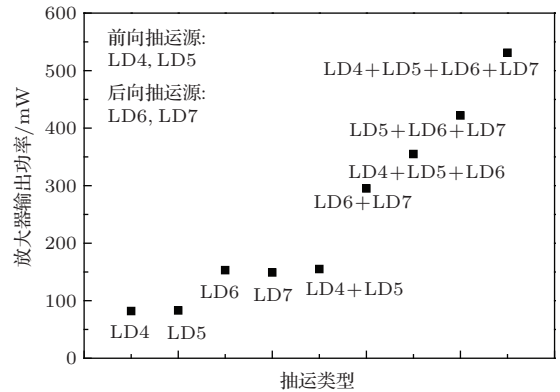


图 2 不同抽运组合下掺 Er 光纤放大器 2 的输出功率  
Fig. 2. Output power of the Er-doped femtosecond fiber amplifier II versus pump types.

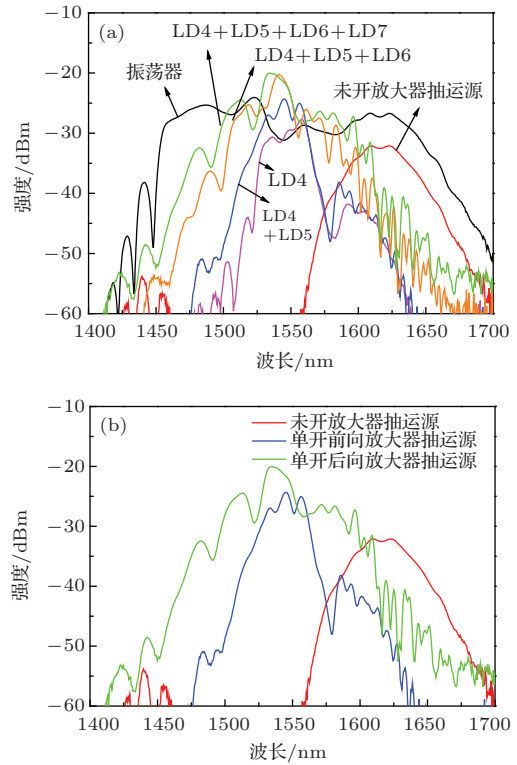


图 3 (网刊彩色) 掺 Er 光纤放大器 2 输出光谱 (a) 抽运源组合数目对放大器输出光谱的影响; (b) 抽运方式对放大器输出光谱的影响  
Fig. 3. (color online) Output spectrum of the Er-doped femtosecond fiber amplifier II. (a) Output spectrum versus pump power; (b) output spectrum versus pump type.

由于脉冲的时域宽度与光谱宽度成反比关系, 为了使放大后脉冲宽度能够压缩至最窄, 在本放大系统的设计过程中, 避免放大过程中的增益窄化现

象的发生,同时通过合理的色散设计使放大过程中存在最窄脉冲,利用放大器中光纤自身的非线性效应使放大后光谱保持足够的宽度.图3(a)给出了随着抽运源组合数目的增加放大器输出光谱的变化.从图中可以看出,随着抽运功率的增加,放大后光谱逐渐发生展宽.展宽后的光谱有利于更窄脉冲的获取.需要说明的是,虽然光谱宽度和时域宽度有直接关系,但为了便于实验系统的建立和优化,我们并没有监测脉冲宽度的变化,而是直接观察光谱的变化趋势.图3(b)给出了单开前向抽运和单开后向抽运时放大器输出光谱的变化.由于后向抽运时放大后的功率要明显高于前向抽运,这使得激光在放大器中积累了足够的非线性效应,从而导致后单开向抽运时放大器的输出光谱要宽于单开前向抽运时放大器的输出光谱.

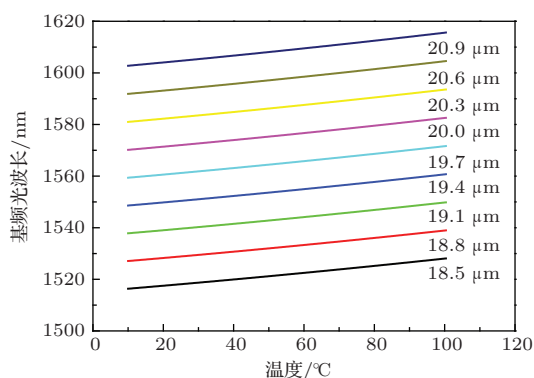


图4 不同温度下,晶体各个通道对应的最佳基频光波长  
Fig. 4. Optimal fundamental wavelength versus temperature for different channels of PPLN crystal.

种子光放大后经过准直器 Col7 转变为空间光路进入倍频晶体实现频率转换.实验中采用的倍频晶体为多通道结构的周期极化掺氧化镁铌酸锂晶体  $\text{MgO:PPLN}$ .晶体通道结构为  $18.5\text{--}20.9\ \mu\text{m}$ .晶体通光截面尺寸为  $0.5\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ ,通光长度为  $1\ \text{mm}$ 晶体前后表面分别镀有对  $1550\ \text{nm}$ 和  $775\ \text{nm}$ 中心波长的宽带减反膜,反射率小于1%.不同温度下,晶体各个通道对应的最佳基频光波长如图4所示.从图中可以看出,在室温  $22^\circ\text{C}$ 的条件下,该晶体可以实现对中心波长  $1500\text{--}1600\ \text{nm}$ 范围内激光的倍频.实验中选取晶体中的  $19.4\ \mu\text{m}$ 通道进行基频光的倍频.晶体置于黄铜卡件上形成自然制冷,没有进行额外的温度控制.实验证明,这种冷却方式没有对晶体的倍频效率和倍频后功率的稳定性造成影响.晶体前后分别采用焦距为  $7.5\ \text{mm}$ 、数值孔径为  $0.3$ 的短焦距非球面透镜 (F3, F4) 进行

聚焦和光路准直.为了优化倍频晶体前激光的偏振状态,采用一对  $\lambda/4$ 和  $\lambda/2$ 波片组合进行激光偏振方向的调节.

为了实现高倍频效率,我们主要优化 WDM 与 Col7 之间的光纤长度.光纤长度直接和放大后激光的色散有关,进而影响放大后激光的脉冲宽度.当放大后脉冲压缩至最窄脉冲宽度时,倍频效率达到最大.但在具体操作上,脉冲宽度的测量相对比较复杂,除了与光纤长度有关,还与光纤扰动导致的偏振有关,因此我们主要通过监测倍频后输出功率的方式来进行光纤长度的优化.

经过系统优化后,倍频后激光的输出功率为  $170\ \text{mW}$ ,倍频效率为  $32\%$ ,倍频后激光光谱如图5(a)所示.采用干涉自相关仪,测量倍频后激光的脉冲宽度约为  $85\ \text{fs}$ ,相关曲线如图5(b)所示.从相关曲线的形状可以看出,当倍频效率达到最大时,倍频后的激光脉冲高阶色散得到最小的压缩,而主要残余二阶色散.

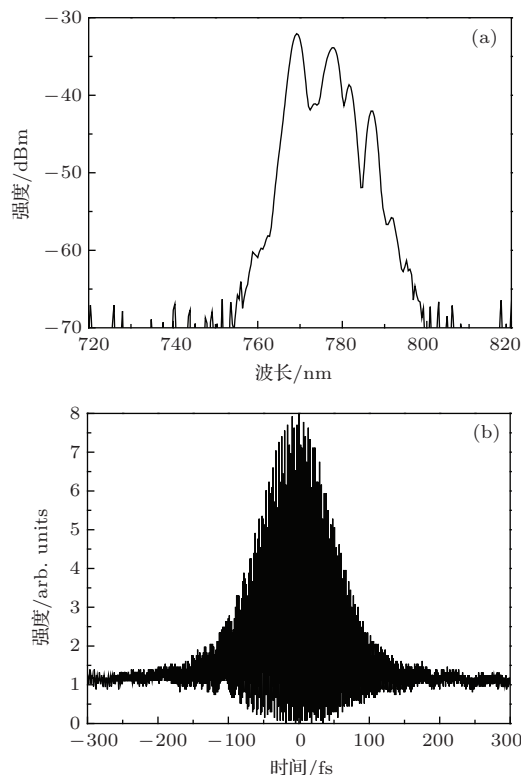


图5  $1550\ \text{nm}$ 飞秒激光倍频后的光谱和自相关曲线 (a) 倍频后激光的光谱形状; (b) 倍频后激光的自相关曲线  
Fig. 5. Output spectrum and pulse duration of the frequency-doubling laser. (a) Spectral profile; (b) interferometric autocorrelation trace.

倍频后的激光通过光子晶体光纤进行光谱展宽.激光在进入光纤前首先通过一个  $\lambda/2$ 波片改变光的偏振方向.通过旋转波片的角度可以微调展宽

后的光谱形状和光谱宽度. 激光经 $\lambda/2$ 波片后, 通过非球面透镜F5耦合进入光子晶体光纤中. 光子晶体光纤前的非球面透镜焦距为3.1 mm、数值孔径为0.68. 从光子晶体光纤光谱展宽后的光束通过焦距为6.24 mm、数值孔径为0.4的非球面透镜F6进行光束准直形成平行光以方便后续光路调节. 光子晶体光纤前的非球面透镜固定于三维电控平移台上, 通过外部电控系统独立地实现对该透镜 $x, y, z$ 方向进行微调.

在170 mW入射功率下, 激光通过光子晶体光纤光谱展宽后的光谱如图6所示. 图中给出了旋转 $\lambda/2$ 波片时两种典型的光谱曲线, 光谱覆盖了500—1000 nm, 输出功率为85 mW, 耦合效率50%. 从图中可以看出碘稳频633 nm He-Ne 激光器和碘稳频532 nm Nd: YAG激光器以及铯原子光钟的698 nm激光和钙离子光钟的729 nm激光波长都包含在展宽后的光谱范围内. 通过优化非球面透镜F5的 $x, y, z$ 三个方向及光的偏振方向, 可以使展宽光谱在不同波长处具有较大强度, 以满足不同激光频率的测量需求.

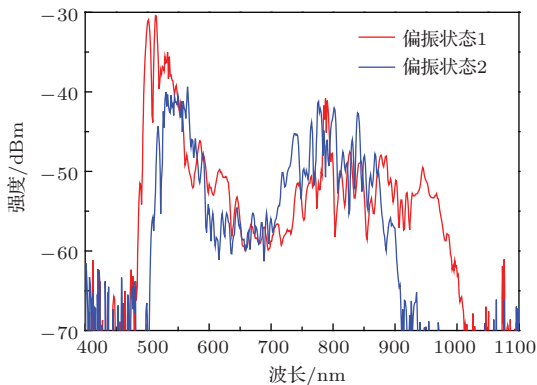


图6 (网刊彩色) 不同偏振状态入射光通过光子晶体光纤获得的光谱展宽

Fig. 6. (color online) Broadened spectrum in a PCF.

为了验证光谱展宽后光学频率梳的性能, 我们以小型化碘稳频532 nm Nd: YAG激光器作为待测激光<sup>[21]</sup>, 将待测激光与光学频率梳光谱展宽后的激光共同耦合进入拍频系统获取拍频信号 $f_b$ , 如图7所示.

调节光子晶体光纤前的 $\lambda/2$ 波片使扩谱后的光谱覆盖532 nm. 经非球面镜后F6的激光通过532 nm高反镜反射后进入拍频系统. 小型化碘稳频532 nm Nd: YAG待测激光经单模保偏光纤传输耦合进入拍频系统. 准直器Col9耦合输出的激光功率约为1.5 mW, 与光学频率梳扩谱后的激光在PBS上进行合束. 采用单模保偏光纤传输, 一方

面可以方便不同激光测量时的切换, 另一方面可以获得比较好的光斑模式, 同时在传输过程中减小外界环境对激光偏振的干扰. 两路光分别通过 $\lambda/2$ 波片进行偏振旋转, 形成相互垂直的偏振状态. 从第一个PBS透射的光再次经过 $\lambda/2$ 波片使两束光在同一偏振状态下存在投影, 此后通过第二个PBS形成具有一致的偏振状态. 利用1800/mm的光栅G将光谱成分在空间分开, 选取532 nm待测激光的频率成分通过532 nm高反射镜M18耦合进入Si光电探测器PD2中, 探测拍频信号 $f_b$ . 经过仔细调节两路光的空间重合以及偏振状态, 在频谱仪100 kHz带宽分辨率的条件下可以获得30 dB信噪比的拍频信号, 如图8所示. 该信噪比的信号可以满足计数器的计数要求. 这说明扩谱后的掺Er光纤光学频率梳可以满足可见光频率测量的需要.

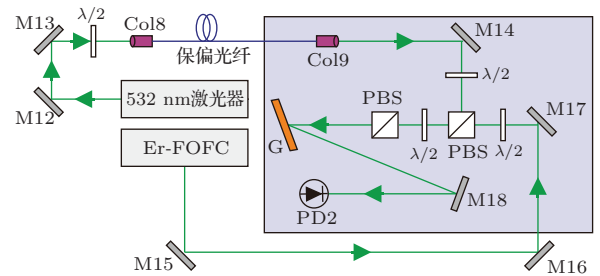


图7  $f_b$  探测系统光路图, 其中 Er-FOFC 为可见光扩谱后的掺 Er 光纤光学频率梳, Col8, Col9 为光纤准直器, PBS 为偏振分光片,  $\lambda/4$  为四分之一波片,  $\lambda/2$  为二分之一波片, M12—M18 为平面反射镜, G 为光栅, PD2 为 Si 光电探测器 Fig. 7. Setup for detection of beat signal. Er-FOFC is an comb with wavelengths covering visible light. Col8, Col9, fiber collimators; PBS, polarization beam splitter;  $\lambda/4$ , quarter wave plate;  $\lambda/2$ , half wave plate; M12—M18, plane mirrors; G, grating; PD2, Si photodetector.

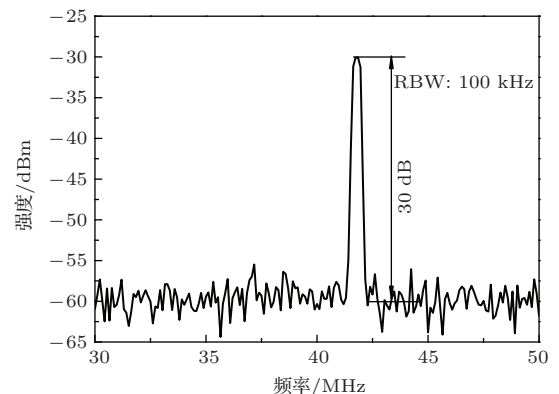


图8 掺 Er 光纤光学频率梳与小型化碘稳频 532 nm Nd: YAG 激光器的拍频信号, 其中 RBW 为 100 kHz

Fig. 8. The beat signal  $f_b$  between an Er-FOFC and a compact iodine-stabilized frequency-doubled Nd: YAG laser at 532 nm. The signal-to-noise ratio of  $f_b$  is 30 dB at 100 kHz RBW.

## 4 结 论

本文介绍了掺 Er 光纤飞秒光学频率梳波长向可见光波段扩展的研究工作. 在自行研制的掺 Er 光纤光学频率梳的基础上, 以其中一个端口为源头, 通过放大-倍频-扩谱的方案, 实现了激光输出波长向可见光波长范围的扩展, 放大后的基频光输出功率为 531 mW, 倍频后输出功率 170 mW, 通过光子晶体光纤光谱展宽后波长覆盖范围为 500—1000 nm, 展宽光谱功率为 85 mW. 采用该光学频率梳与小型化碘稳频 532 nm Nd: YAG 激光器进行拍频, 获得了 30 dB 信噪比的拍频信号.

掺 Er 光纤飞秒光学频率梳波长向可见光波段的扩展, 不仅可以满足碘稳频 633 nm He-Ne 激光器和碘稳频 532 nm Nd: YAG 激光器的绝对频率测量的要求, 实现把长度单位 m 直接溯源到时间单位 s, 也可以通过协调世界时 (UTC) 实现实时国际比对和等效互认, 同时可以为铯原子光钟、钙离子光钟的绝对频率测量与比对提供技术手段, 保证我国高精度光钟基准实验装置研究及应用的顺利进行.

## 参考文献

- [1] Udem Th, Reichert J, Holzwarth R, Hänsch T W 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568
- [2] Stone J A, Egan P 2010 *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **115** 413
- [3] Kohno T, Yasuda M, Hosaka K, Inaba H, Nakajima Y, Hong F L 2009 *Appl. Phys. Express* **2** 072501
- [4] Chou C W, Hume D B, Koelemeij J C J, Wineland D J, and Rosenband T 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 070802
- [5] Campbell G K, Ludlow A D, Blatt S, Thomsen J W, Martin M J, de Miranda M H G, Zelevinsky T, Boyd M M, Ye J, Diddams S A, Heavner Th P, Parker Th E, Jefferts S R 2008 *Metrologia*. **45** 539
- [6] Huang Y, Cao J, Liu P, Liang K, Ou B, Guan H, Huang X, Li T, Gao K 2012 *Phys. Rev. A* **85** 030503
- [7] Thorpe M J, Balslev-Clausen D, Kirchner M S, Ye J 2008 *Opt. Express* **16** 2387
- [8] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photonics* **3** 351
- [9] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R 2004 *Opt. Lett.* **29** 1542
- [10] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, Nicholson J W, Yan M F, Jorgensen C G 2004 *Opt. Lett.* **29** 250
- [11] Ruehl A, Marcinkevicius A, Fermann M E, Hartl I 2010 *Opt. Lett.* **35** 3015
- [12] Peng J L, Ahn H, Shu R H, Chui H C, Nicholson J W 2007 *Appl. Phys. B* **86** 49
- [13] Kieu K, Jones R J, Peyghambarian N 2010 *Opt. Express* **18** 21350
- [14] Cao S Y, Cai Y, Wang G Z, Meng F, Zhang Z G, Fang Z J, Li T C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094208 (in Chinese) [曹士英, 蔡岳, 王贵重, 孟飞, 张志刚, 方占军, 李天初 2011 物理学报 **60** 094208]
- [15] Lea S N, Rowley W R C, Margolis H S, Barwood G P, Huang G, Gill P I, Chartier J M, Windeler R S 2003 *Metrologia* **40** 844
- [16] Eickhoff M L, Hall J L 1995 *IEEE E T rans. Inst rum. Meas.* **44** 155
- [17] Diddams S A, Jones D J, Ye J, Cundiff S T, Hall J L, Ranka J K, Windeler R S, Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102
- [18] Fujieda M, Kumagai M, Nagano S, Yamaguchi A, Hachisu H, Ido T 2011 *Opt. Express* **19** 16498
- [19] Ludlow A D, Zelevinsky T, Campbell G K, Blatt S, Boyd M M, de Miranda M H G, Martin M J, Thomsen J W, Foreman S M, Ye J, Fortier T M, Stalnaker J E, Diddams S A, Le Coq Y, Barber Z W, Poli N, Lemke N D, Beck K M, Oates C W 2008 *Science* **319** 1805
- [20] Cao S Y, Meng F, Lin B K, Fang Z J, Li T C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134205 (in Chinese) [曹士英, 孟飞, 林百科, 方占军, 李天初 2012 物理学报 **61** 134205]
- [21] Lin B K, Cao S Y, Zhao Y, Li Y, Wang Q, Lin Y G, Cao J P, Zang E J, Fang Z J, Li T C 2014 *Chinese J. Lasers* **41** 0902002 (in Chinese) [林百科, 曹士英, 赵阳, 李焯, 王强, 林弋戈, 曹建平, 臧二军, 方占军, 李天初 2014 中国激光 **41** 0902002]

# Er-fiber femtosecond optical frequency comb covering visible light\*

Liu Huan<sup>1)</sup> Cao Shi-Ying<sup>2)†</sup> Meng Fei<sup>2)</sup> Lin Bai-Ke<sup>2)</sup> Fang Zhan-Jun<sup>2)</sup>

1) (*Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China*)

( Received 2 October 2014; revised manuscript received 7 November 2014 )

## Abstract

Femtosecond optical frequency combs (FOFCs) with output wavelengths covering visible light have potential applications in absolute frequency measurement of iodine-stabilized lasers and optical clock lasers. Based on optical amplification, frequency doubling and spectrum broadening, a home-made Er-fiber femtosecond optical frequency comb (Er-FOFC) with output wavelengths covering visible light is demonstrated. One path with an average power of 8 mW from Er-FOFC is used as the seed pulse for spectrum broadening to cover the visible light. This path is first amplified to 532 mW by injecting into an Er-doped femtosecond fiber amplifier with combined forward and backward pumping and then frequency doubled with a MgO: PPLN crystal with an output power of 85 mW, frequency-doubling efficiency of 32% and pulse duration of 85 fs. The output power of this path can be first amplified to 532 mW through an Er-doped femtosecond fiber amplifier when the forward pumping and backward pumping both turn on. Then the frequency-doubling laser can be generated in a MgO: PPLN crystal. The frequency-doubling efficiency is 32% and the pulse duration is 85 fs; the frequency-doubling light is spectrally broadened from 500 to 1000 nm in a photonic crystal fiber (PCF), with an output power of 85 mW and coupling efficiency of 50%. To verify the performance of the broadened spectrum, the light from the Er-FOFC and a compact iodine-stabilized frequency-doubled Nd: YAG laser at 532 nm is beaten. A beat signal with a signal-to-noise ratio of 30 dB at 100 kHz RBW is obtained, which provides a useful tool for absolute frequency measurement of visible lasers.

**Keywords:** Er-doped fiber laser, fiber optical frequency comb, spectrum broadening, optical frequency metrology

**PACS:** 42.55.Wd, 42.65.Re, 06.30.Ft, 95.55.Sh

**DOI:** [10.7498/aps.64.094204](https://doi.org/10.7498/aps.64.094204)

---

\* Project supported by the Tsinghua University Initiative Scientific Research Program, China (Grant No. 20131089299), the Special Scientific Research Foundation of General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China (Grant No. 20130007), the Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project, China (Grant No. YETP0087), and the State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments of China (Grant No. pil1201).

† Corresponding author. E-mail: [caoshiying@nim.ac.cn](mailto:caoshiying@nim.ac.cn)